

УДК 523.24.312

В. П. Епишев, И. И. Исак, И. И. Мотрунич,  
И. Ф. Найбауэр, Э. И. Новак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

## Определение структурных особенностей поверхности ИСЗ

Надійшла до редакції 26.10.06

Розглядається можливість вивчення характеристик окремих ділянок поверхні ІСЗ за результатами наземних оптичних спостережень. Використання результатів колориметрії, поляриметрії і встановленої орієнтації окремих фрагментів поверхні ІСЗ дозволяє у 85 % випадків успішно змоделювати складну форму космічного апарата. Показані шляхи розв'язку цих задач на основі аналізу даних спостережень.

**Введение.** Отраженный солнечный свет от ИСЗ может быть нескольких типов: зеркальным или диффузным от диэлектрических покрытий, зеркальным или диффузным от гладких и грубых металлических поверхностей, переотраженным от различных частей объекта, или комбинацией названных типов, сливающихся в единый результирующий поток, идущий к наблюдателю. Кроме того, при одинаковых условиях освещенности (исключая случай нормального падения света), результатом отражения от металлической поверхности будет эллиптически поляризованная волна, а от диэлектрической — частично линейно поляризованная. Казалось бы, что такая сложная структура отраженного от ИСЗ излучения «перекрыла» доступ к установлению микрофрагментации поверхности космического аппарата (КА) и ее оптических свойств.

**Решение проблемы.** На ИСЗ падает солнечное излучение с максимумом в желто-зеленой области спектра и показателем цвета

$$C = B - V = 0.63^m, \quad (1)$$

где  $B$  и  $V$  — блеск КА в синей и желто-зеленой областях спектра соответственно. Изменение показателя цвета (колор-индекса) солнечного излучения после его отражения от спутника ока-

залось довольно хорошим индикатором свойств отражательной поверхности. Объединив информацию о блеске КА, полученную синхронно в нескольких близких областях спектра, с данными об ориентации в выбранной системе координат фрагментов его поверхности, можно уверенно говорить о конструктивных особенностях формы ИСЗ и отражательных свойствах элементов ее поверхности. Накопленный в нашей лаборатории за многие годы опыт показывает, что основываясь даже на законах ламбертовского рассеяния света, но с удачным подбором сочетания простых стереометрических форм отражательной поверхности, можно достичь приемлемых результатов и при описании КА сложной конструкции.

Эффективными в решении обсуждаемой задачи могут быть также результаты поляризационных наблюдений КА. Но из-за особенностей свечения ИСЗ, их быстрого перемещения на орбите и собственного вращения полноценная поляриметрия с земной поверхности так и не получила пока массового распространения. И все же использование даже простых поляриметрических приспособлений, временно размещенных в электрофотометре, помогает более уверенно определяться с покрытием близких по

форме КА, отделять маломощное зеркальное отражение от диффузного, отождествлять на поверхности ИСЗ детали из одинакового материала, но размещенные в разных местах. Достаточно закрепить поляризатор — дихроичную пленку [2] — в каналах электрофотометра во взаимно перпендикулярных плоскостях. Требуемое их вращение компенсирует изменение угла падения солнечного света на поверхность ИСЗ в диапазоне 40—50° на интервале наблюдения одного его прохождения. Так как степень поляризации света, в зависимости от угла его падения на металлические поверхности, изменяется заметно, ее оценку с учетом периода собственного вращения ИСЗ достаточно проводить по приближенной формуле [3]

$$P \approx 0.461 \Delta m_{pol}, \quad (2)$$

где  $\Delta m_{pol}$  — разница величины блеска спутника при минимальном и каждом последующем значении угла падения света на его поверхность.

**Полученные результаты.** Решение задачи отработано на реальных наблюдениях нескольких десятков низко- и высокоорбитальных искусственных объектов, проведенных в Ужгороде в разное время. Здесь мы не будем обсуждать вопросы расчета ориентации ИСЗ по результатам наземных наблюдений, методики подбора и определения фазовых функций (индикатрис рассеяния света) как для отдельных стереометрических форм, так и их комбинаций. Ключевые моменты этой методики упоминаются в работе [1]. В целом подбор фазовой функции для  $i$ -го участка поверхности ИСЗ осуществляется путем расчета поправки

$$\Delta m_{\psi} = -2.5 \lg(F(\psi_i, \varepsilon_i, \theta_i) / F(\psi_0, \varepsilon_0, \theta_0)) \quad (3)$$

и введения ее в наблюдаемое значение блеска объекта. Здесь  $\psi_i$  — фазовый угол,  $\varepsilon_i, \theta_i$  — углы падения и отражения солнечного света от  $i$ -го участка поверхности ИСЗ,  $\psi_0, \varepsilon_0, \theta_0$  — их стандартные или нулевые значения. Если фазовые функции (индикатрисы рассеяния) выбраны верно, то средние абсолютные значения блеска для исследуемых участков поверхности КА сложной формы, контролируемых колор-индексом, становятся постоянными (см. рис. 1, б и рис. 2, в). В противном случае перебор фазовых функций продолжается. Для уменьшения неопределенности дополнительно устанавливаются

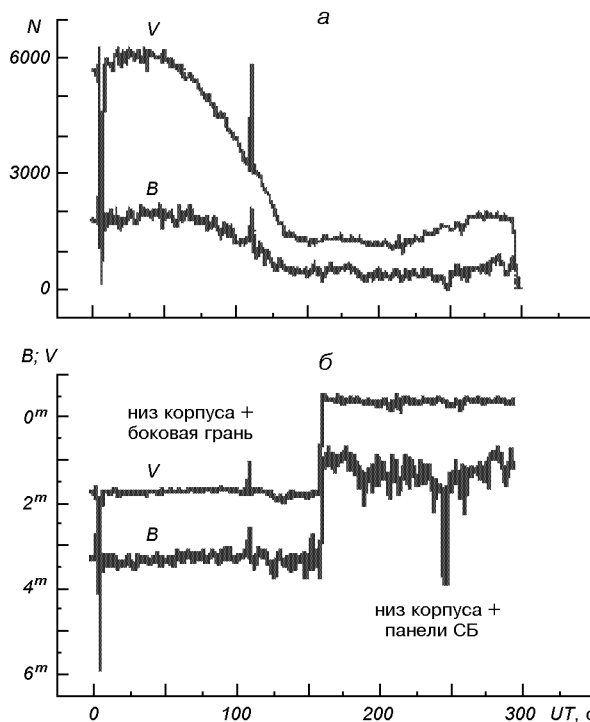


Рис. 1. Изменение блеска ИСЗ «Spot-1» 27 июня 1990 г. (начало — 22 ч 40 мин 30 с UT): а, — в инструментальных единицах, б — абсолютные значения блеска

критерии, подтверждающие отдельные особенности как самого ИСЗ, так и его орбиты. Эффекты переотражения и затенения света конструкциями поверхности КА искажают полученные результаты (рис. 2, в). В последующих расчетах при необходимости их можно учесть.

На примере нескольких КА рассмотрим основные этапы решения задачи и полученные экспериментальные результаты. Типичные кривые блеска французских спутников «Spot-1» (№ 86019.01), «Spot-4» (№ 98017.01) и значение колор-индекса «Spot-4» на одну из дат представлены на рис. 1 и 2. После учета изменения блеска ИСЗ из-за экстинкции, расстояния до них, их подсветки со стороны земной поверхности, кривые были разделены на отдельные участки по значению колор-индекса (например, в местах появления или отсутствия в поле зрения панели солнечных батарей). Каждый из них анализировался с использованием данных об ориентации объекта на момент наблюдений и фазовой зависимости блеска. Расчеты показали,

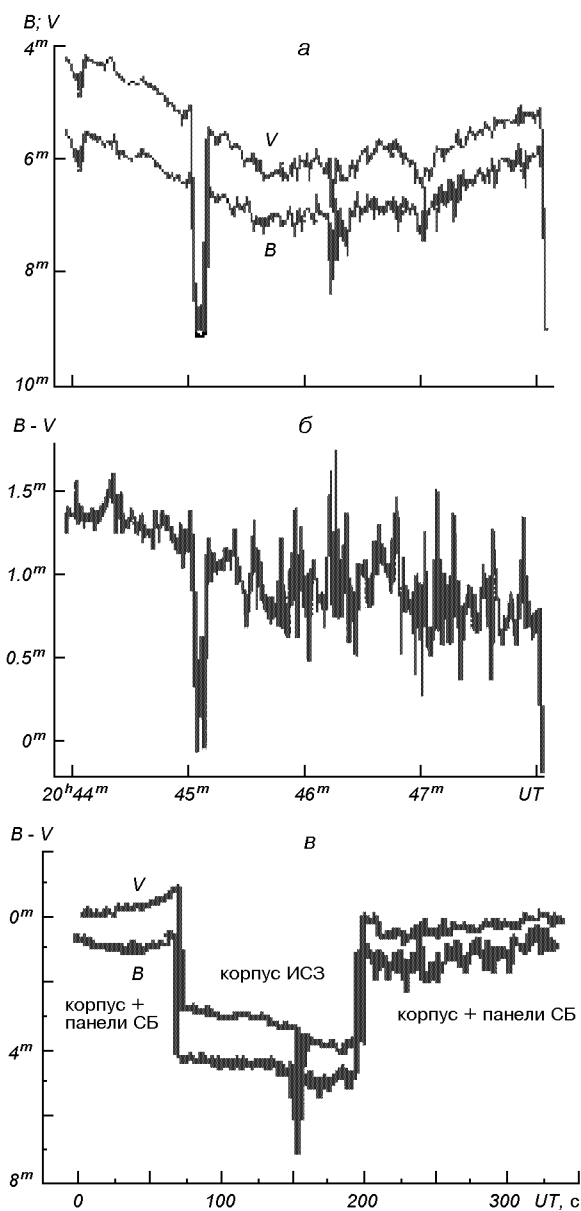


Рис. 2. Стандартизированные кривые (а) и колор-индекс (б) блеска ИСЗ «Spot-4» 18 мая 2002 г.; в — абсолютные значения блеска ИСЗ «Spot-4» 18 июня 2002 г. (начало — 20 ч 46 мин 41 с UT)

что поверхность ИСЗ «Spot-1» состоит из набора различно ориентированных плоских фрагментов, а ИСЗ «Spot-4» — плоских и цилиндра. Вклад отраженного от панелей солнечных батарей света в общий блеск ИСЗ хорошо описывался при условии отслеживания батареями Солнца

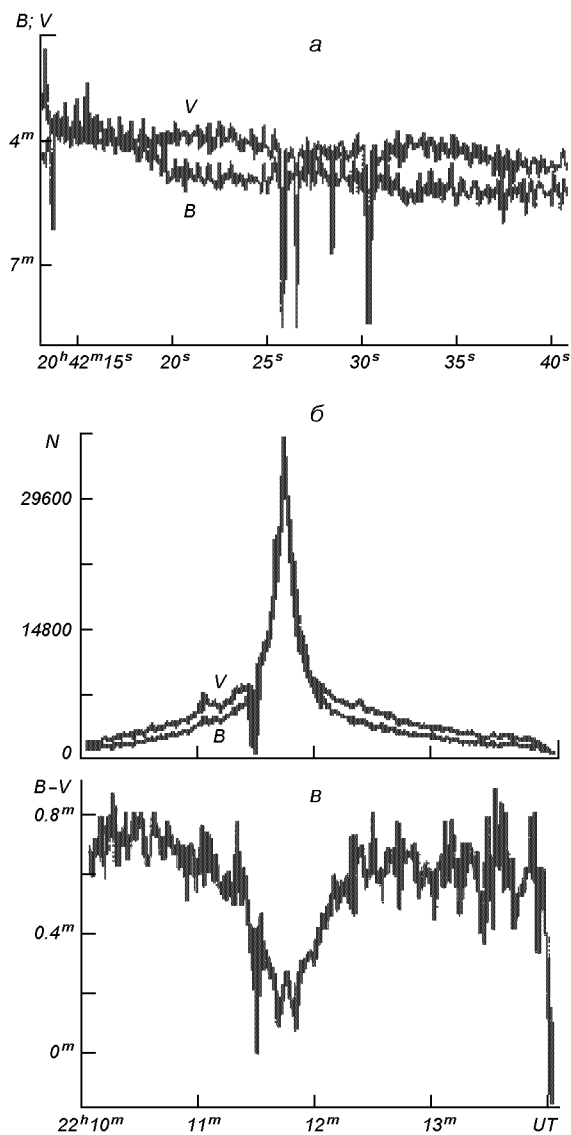


Рис. 3. Кривые блеска ИСЗ «Ferret-D»: а — стандартизированные кривые 21 июня 2002 г., б, в — инструментальные кривые и колор-индекс блеска 18 июня 2002 г. (№ 92023.01)

с постоянным к нему наклоном около 30°. По известной ориентации КА и фазовой зависимости его блеска путем приведения к фазовому углу  $\psi = 0$  и значению функции  $F(\psi) = 1$  получено абсолютное значение блеска ИСЗ в зависимости от того, какой фрагмент его поверхности находился в данный момент в поле зрения наблюдателя (рис. 1, б, рис. 2, в). В результате моделирования и сопоставления с

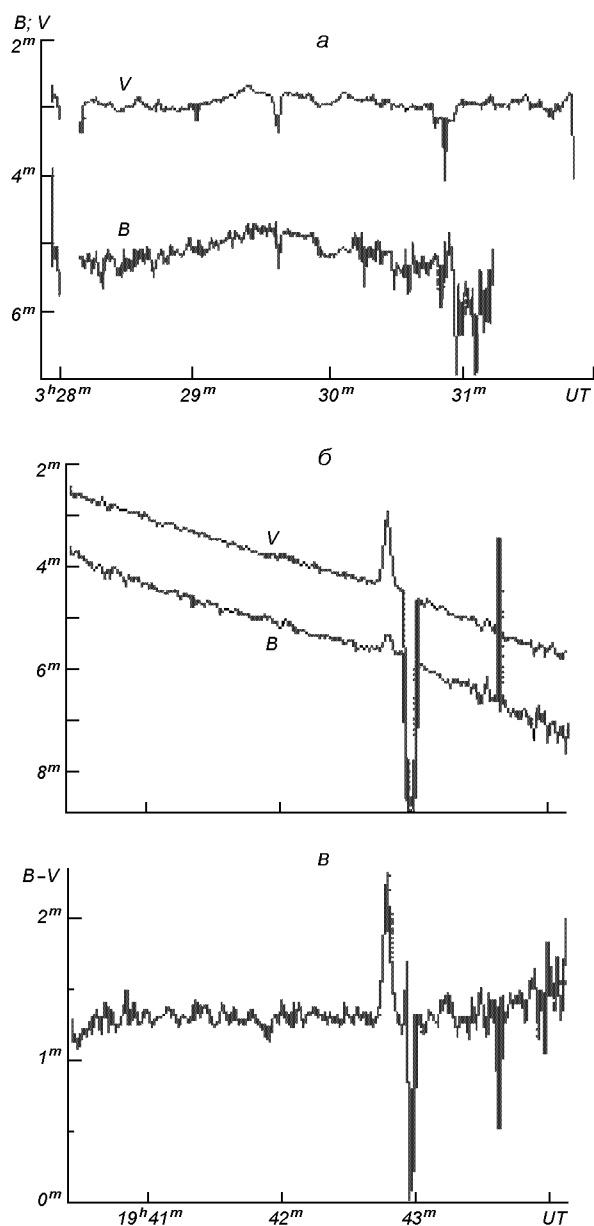


Рис. 4. Кривые блеска ИСЗ: *a* — стандартизированные кривые «Сич-1» за 12 октября 1996 г. (с учетом фазы), *б, в* — стандартизированные кривые и колор-индекс «ERS-1» 7 августа 1992 г.

аналогами современных ИСЗ форма «Spot-1» и «Spot-4» представляется такой, как показано на рис. 6, *a, б*.

У объекта «Spot-1» наблюдаются зеркальные вспышки с преобладанием синей составляющей. Исследование ориентации показало, что они

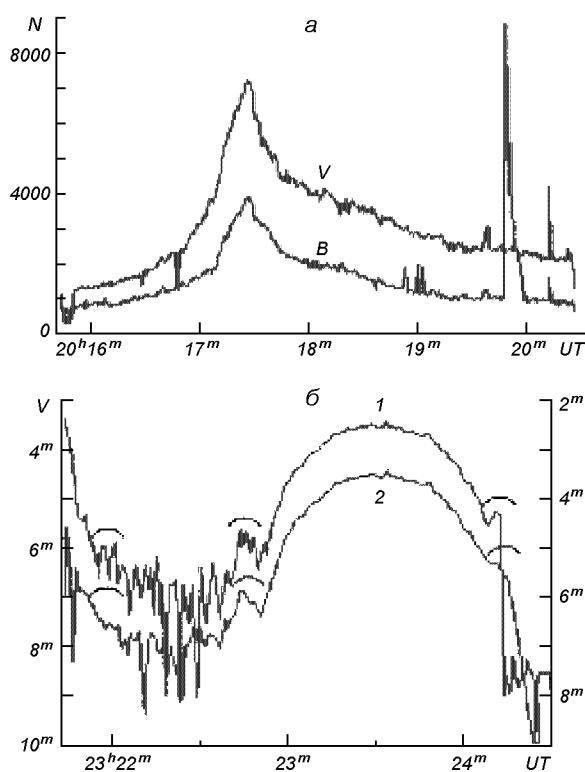


Рис. 5. Кривые блеска: *a* — инструментальные кривые «Tiroc-N» 20 мая 1990 г., *б* — кривые блеска объекта № 70047.02 за 5 августа 1986 г. (1 — поляриод на максимуме пропускания, 2 — на минимуме)

идут от детали (скорее всего объектива), которая размещена в днище корпуса под углом 21–23° к направлению в подспутниковую точку и вращается с периодом 84.5 с. У объекта «Spot-4» выявлено увеличение блеска в синей области спектра, идущего от похожей на объектив детали, расположенной в торцевой части его корпуса.

Аналогично исследованы особенности поверхности других ИСЗ. Американский спутник № 92023.01 второго поколения системы «Ferret-D» быстро вращается с периодом 1.2 с. Но, как видно из рис. 3, *a*, кроме быстрого вращения объект осуществляет и колебательные движения с периодом 10.8 с. Синяя и желтая составляющие блеска изменяются в противофазе. Мощный пик на кривых блеска (рис. 3, *б*) обусловлен появлением при определенном ракурсе зеркальной составляющей отраженного света, порождающей образующей вдоль боковой квазицилин-

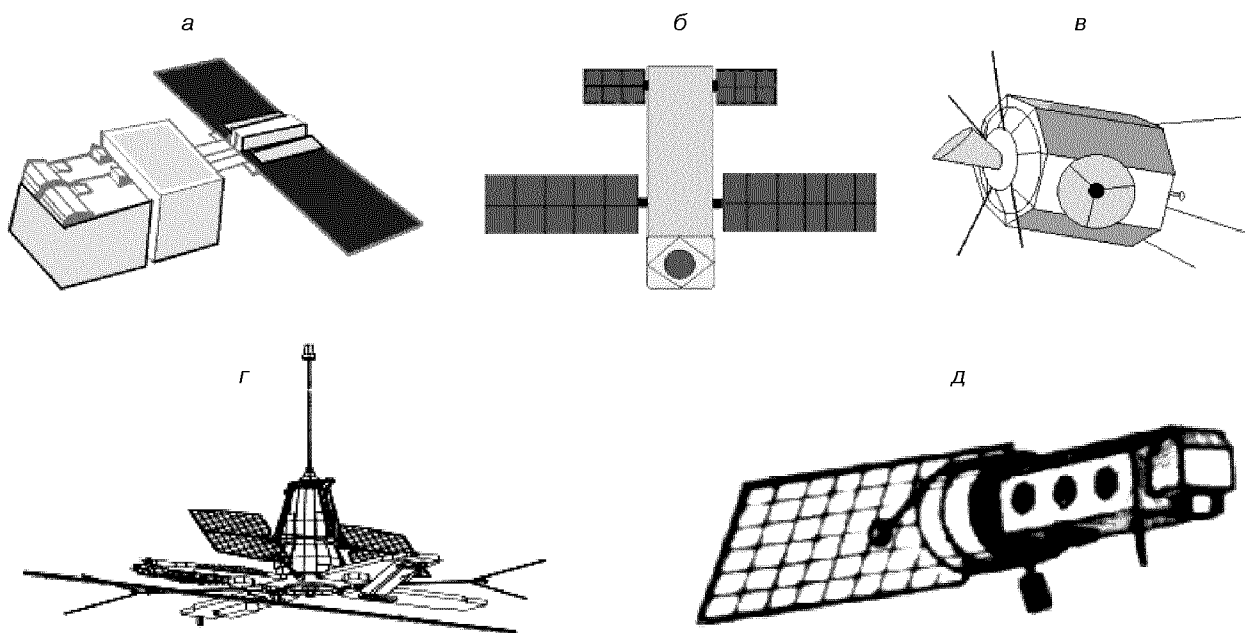


Рис. 6. Модели ИСЗ: *а* — «Spot-1», *б* — «Spot-4», *в* — «Ferret-D», (№ 88078.01, №92023.01) по результатам наблюдений в Ужгороде, *г* — «Січ-1», *д* — спутник ВМФ США «Tiros-N»

дрической поверхности спутника. По изменению направления нормали в момент зеркальной вспышки от прохождения к прохождению ИСЗ видно, что отражающая зеркально поверхность спутника вращается в экваториальной плоскости с некоторой поправкой на колебания. Ее цветовые характеристики близки к панелям солнечных батарей (рис. 3, *в*). Результирующая модель представителя системы второго поколения «Ferret-D» приведена на рис. 6, *в*.

В случае наблюдения ИСЗ «Січ-1» (рис. 4, *а*, рис. 6, *г*) мы смогли выделить на кривых блеска участки, когда в поле зрения наблюдателя преимущественно были видны радиоантенны. Потом между ними появлялся корпус, а в конце трассы просматривались панели солнечных батарей. Зная форму объекта и основные фрагменты его поверхности, мы смогли по этим наблюдениям отработать фиксацию по значению колор-индекса появления в поле зрения того или иного фрагмента в случае диффузного отражения света.

На кривых блеска (рис. 5, *а*) американского ИСЗ «Tiros-N» (рис. 6, *д*) отметим мощную световую вспышку в синей области спектра в конце наблюдаемой трассы. По результатам

ориентации спутника во время прохождений удалось установить, что деталь, дающая мощный синий блик, размещена в его днище. На рис. 6, *д* видно темное пятно в нижней части корпуса ИСЗ. Это не просто объектив фотоаппарата, а скорее всего объектив телескопа.

В отличие от кривых блеска спутника «Tiros-N», на кривых блеска американского ИСЗ «ERS-1» была зафиксирована мощная световая вспышка в желто-зеленой области спектра (рис. 4, *б*). Если сравнить полученное значение колор-индекса (рис. 4, *в*) с аналогичным значением для объекта «Січ-1» во время нахождения в поле зрения радиоантенн, мы видим практически полное совпадение, что подтверждает наличие мощной радиоантенны и у этого спутника. Далее на спутнике видна слабо светящаяся синяя деталь, а в конце кривой блеска отмечается световой блик, согласно цветовым характеристикам — от панелей солнечной батареи.

На рис. 5, *б* приведена одна из кривых блеска ступени ракеты советской системы «Метеор», записанная через поляриод, размещенный в двух каналах фотометра во взаимно перпендикулярных плоскостях. На графике две поляризационные составляющие искусственно разнесены

на 1<sup>m</sup> для лучшей наглядности. Там, где от объекта идет диффузное излучение, кривые практически одинаковые. Там, где есть зеркальная составляющая, а следовательно, и поляризационный эффект, детали кривых различаются (отмечены дугами). Полученное значение степени поляризации показало, что эти детали в торцевых частях ракеты сделаны с одного и того же материала.

Проведение таких исследований позволяет судить не только о конструктивных особенностях поверхности ИСЗ на момент наблюдений, но и об их изменениях со временем.

1. Братийчук М. В., Гвардионов А. Б., Епишев В. П. и др. Фотоэлектрическая фотометрия спутника «Интеркосмос-Болгария-1300» // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 1.—С. 60—65.

2. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976.—926 с.

3. Мартынов Д. Я. Курс практической астрофизики. — М.: Наука, 1977.—543 с.

---

#### DETERMINATION OF STRUCTURAL FEATURES OF ARTIFICIAL EARTH SATELLITE SURFACES

*V. P. Yepishev, I. I. Isak, I. I. Motrunich,  
I. F. Naubauer, E. J. Novak*

The possibility to study some properties of individual parts of artificial Earth satellite surfaces from results of ground-based observations is considered. Using the results of colorimetry, polarimetry and the determined orientation of individual parts of the surface of a satellite allows one, in the 85 % of the cases, to model complicated shapes of the space vehicle under investigation. We propose some ways to solve such problems on the basis of observational data analysis.